

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-28-38>
УДК 621.92.941.95.005Оригинальная статья**Б. М. Базров¹, М. Л. Хейфец^{2*}**¹*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук,
Малый Харитоньевский переулок, 4, 101000, Москва, Российская Федерация*²*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь***МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ
КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ**

Аннотация. В связи с кастомизацией производства особенно актуальной становится отработка конструкции изделия на технологичность на всех стадиях его создания. Предлагается метод повышения технологичности конструкции изделия на этапе разработки рабочей документации изделия, базирующийся на ее оценке посредством суммирования коэффициентов технологичности. Метод заключается в построении регрессионного ряда характеристик конструкции изделия по степени снижения их влияния на трудоемкость конструкции и установлении последовательности ее улучшения. Рекомендовано для повышения технологичности и снижения трудоемкости изготовления изделия обращать внимание сначала на методы достижения точности при сборке, а также использование в сборках максимального количества покупных деталей; затем на повторяемость видов соединений деталей в конструкции, снижение количества видов и трудоемкости выполнения соединений и в конце на повторяемость деталей в общей конструкции, максимальное использование заимствованных деталей. Показано, что типизацией процессов и унификацией конструктивных элементов эффективно заниматься на уровне крупных объединений (холдингов, концернов) и особенно отраслей промышленности.

Ключевые слова: конструкция изделия, характеристика конструкции, технологичность конструкции, коэффициент технологичности, трудоемкость изготовления

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии доктор технических наук, профессор М. Л. Хейфец.

Информация об авторах: *Базров Борис Мухтарбекович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Теория модульной технологии» Института машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук. E-mail: modul_lab@mail.ru; *Хейфец Михаил Львович** – доктор технических наук, профессор, директор Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru

Вклад авторов: *Базров Борис Мухтарбекович* – разработка и апробация метода повышения технологичности конструкции изделия на этапе создания его рабочей документации, редактирование рукописи; *Хейфец Михаил Львович* – выработка рекомендаций по повышению технологичности конструкции изделия в зависимости от масштабов его производства, написание текста статьи.

Для цитирования: Базров, Б. М. Метод повышения производственной технологичности конструкции изделия / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 28–38. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-28-38>

Поступила в редакцию: 17.08.2023

Утверждена к публикации: 30.11.2023

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

Boris M. Bazrov¹, Mikhail L. Kheifetz^{2*}

¹*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
4, Maly Kharitonyevsky Pereulok, 101000, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

**METHOD OF IMPROVING THE PRODUCTION MANUFACTURABILITY
OF THE PRODUCT DESIGN**

Abstract. Due to the customization of production, it becomes especially important to test the design of the product for manufacturability at all stages of its creation. A method is proposed to improve the manufacturability of the product design at the stage of developing the working documentation of the product, based on its evaluation by summing the coefficients of manufacturability. The method consists in constructing a regression series of product design characteristics according to the degree of reduction of their impact on the complexity of the design and establishing the sequence of its improvement. It is recommended to improve manufacturability and reduce the labor intensity of manufacturing a product, to pay attention from the beginning to methods for achieving accuracy during assembly, as well as the use of the maximum number of purchased parts in assemblies; then on the repeatability of the types of connections of parts in the design, reducing the number of types and laboriousness of making connections, and finally on the repeatability of parts in the overall design, the maximum use of borrowed parts. It is shown that the typification of processes and the unification of structures can be effectively dealt with at the level of large associations (holdings, concerns) and especially industries.

Keywords: product design, characteristics product design, manufacturability product design, coefficient of manufacturability, labor intensity

Conflict of interest: the author's team includes the member of the Editorial Board Dr. Sci. (Engineering), Professor Mikhail L. Kheifetz.

Information about the authors: *Boris M. Bazrov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory “Theory of Modular Technology” at Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. E-mail: modul_lab@mail.ru; *Mikhail L. Kheifetz** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru

Contribution of the authors: *Boris M. Bazrov* – development and testing of a method for improving the manufacturability of a product design at the stage of creating its working documentation, editing the manuscript; *Mikhail L. Kheifetz* – development of recommendations for improving the manufacturability of a product design depending on the scale of its production, writing the text of the article.

For citation: Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Method of improving the production manufacturability of the product design. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 28–38 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-28-38>

Received: 17.08.2023

Approved for publication: 30.11.2023

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. Производственная технологичность конструкции изделия (ТКИ) определяет трудоемкость его изготовления [1, 2]. В связи с этим важна отработка конструкции изделия на технологичность на всех стадиях создания изделия: при разработке технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей конструкторской документации опытного образца и серийного изделия и при технологической подготовке производства [3, 4]. На первых трех стадиях создания изделия повышение ТКИ осуществляется на основе рекомендации технолога и отличается невысокой эффективностью, так как на этих стадиях недостаточно информации о конструкции изделия (КИ). Наиболее эффективным является повышение уровня технологичности, начиная со стадии разработки рабочей документации на КИ, потому что на этой стадии имеется полная информация о конструкции [4, 5].

Цель исследования – разработка и применение методики повышения уровня технологичности конструкции изделия на стадии подготовки конструкторской документации.

Процесс отработки конструкции на технологичность на этой стадии может производиться конструктором без участия технолога в автоматическом режиме с использованием программных средств. Поэтому особенно актуальны разработка и применение предельно формализованной методики принятия конструкторско-технологических решений при цифровизации производства [6, 7] и для сквозной компьютерной поддержки жизненного цикла изделия [8, 9].

Метод интегрированной оценки технологичности конструкции изделия. Широко распространены два метода оценки уровня ТКИ [4]. Первый метод заключается в определении уровня

данного параметра изделия с помощью основных показателей эффективности производства, таких как трудоемкость и технологическая себестоимость. Второй метод состоит в оценке уровня ТКИ с помощью коэффициентов технологичности, таких как коэффициенты стандартизации, повторяемости, точности обработки и др. Данная оценка должна показывать влияние на трудоемкость не только конструкции изделия, но и ее характеристик.

Первый метод дает возможность получить ответ на вопрос, соответствует ли уровень ТКИ нового изделия заданному значению технологичности, но не показывает, какие характеристики КИ и в какой степени влияют на трудоемкость ее изготовления. Это является существенным недостатком при оценке уровня ТКИ, так как не позволяет определить, с каких характеристик и в какой последовательности следует улучшать их значения, чтобы достигнуть заданного уровня технологичности.

Второй метод оценки уровня ТКИ позволяет не только определить уровень технологичности, но и установить, какие характеристики конструкции изделия и в какой степени влияют на полную трудоемкость ее изготовления. Однако это преимущество не используется, так как известные расчетные формулы коэффициентов технологичности не отражают степени влияния соответствующих характеристик КИ на трудоемкость изготовления изделия.

В результате оценка уровня ТКИ осуществляется технологом, который выбирает из известных коэффициенты для определения уровня технологичности конструкции разрабатываемого и внедряемого в производство изделия. Поэтому точность оценки уровня ТКИ напрямую зависит от опыта и квалификации данного специалиста.

Принимая во внимание преимущества второго метода определения ТКИ, а также с целью устранения его недостатков разработан метод интегральной оценки уровня технологичности конструкции посредством суммирования коэффициентов технологичности [4, 10, 11]. Для реализации данного метода определен перечень коэффициентов технологичности (К) и соответствующие характеристики (Х), которые они отражают:

коэффициент покупаемости ($K_{\text{ПОК}}$) – количество покупаемых деталей;
коэффициент заимствования (K_3) – количество заимствованных деталей;
коэффициент повторяемости деталей ($K_{\text{ПВД}}$) – количество повторяемых деталей;
коэффициент повторяемости соединений ($K_{\text{ПВС}}$) – количество повторяемых соединений деталей;
коэффициент типизации ($K_{\text{ТИП}}$) – количество типовых унифицированных деталей;
коэффициент точности деталей ($K_{\text{ТЧ}}$) – уровень точности деталей;
коэффициент шероховатости ($K_{\text{Ш}}$) – уровень шероховатости поверхностей деталей;
коэффициент твердости ($K_{\text{ТВ}}$) – уровень твердости материала деталей;
коэффициент массы ($K_{\text{М}}$) – уровень массы деталей;
коэффициент соединения ($K_{\text{С}}$) – количество видов соединений;
коэффициент методов точности замыкающих звеньев ($K_{\text{МРЦ}}$) – количество методов достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей.

Коэффициенты технологичности, отражающие степень влияния характеристик конструкции изделия. Расчетные формулы перечисленных коэффициентов технологичности отражают степени влияния характеристик КИ на снижение трудоемкости изготовления изделия.

В основу разработки расчетных формул коэффициентов технологичности положены связи между характеристиками КИ и их влиянием на полную трудоемкость изготовления изделий (табл. 1).

Принимая во внимание связи между характеристиками и механизмом их влияния на полную трудоемкость изготовления изделия (см. табл. 1), предложим расчетные формулы коэффициентов технологичности.

Коэффициент покупаемости ($K_{\text{ПОК}}$):

$$K_{\text{ПОК}} = a_1 a_{1.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_1 a_{1.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + \\ + a_2 a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D},$$

где $a_1 = T_1/T$; $a_2 = T_2/T$; $a_{1.1} = T_{1.1}/T_1$; $a_{1.3} = T_{1.3}/T_1$; $a_{2.1} = T_{2.1}/T_2$; $a_{2.2} = T_{2.2}/T_2$; $a_{2.3} = T_{2.3}/T_2$; D – количество деталей в изделии, шт.; $D_{\text{ПОК}i}$ – i -я покупная деталь; $b_{\text{СЛ}i}$ – коэффициент сложности i -й конструкции $D_{\text{ПОК}}$.

Таблица 1. Влияние коэффициентов технологичности на трудоемкость
 Table 1. The effect of the coefficients of manufacturability on labor intensity

Коэффициент технологичности The coefficient of manufacturability	Вид трудоемкости (T _i) Type of labor intensity (T _i)								
	T ₁			T ₂					
	T _{1.1}	T _{1.2}	T _{1.3}	T _{2.1}	T _{2.2}	T _{2.3}	T _{2.4}	T _{2.5}	T _{2.6}
K _{ПОК}	■		■	■	■	■			
K _з	■		■						
K _{ПВД}	■			■					
K _{ПВС}		■	■				■		
K _{ТИП}	■		■						
K _{ТЧ}					■				
K _Ш					■				
K _{ТВ}					■				
K _М						■			■
K _С								■	
K _{МРЦ}		■						■	

Примечание: T₁ – трудоемкость технологической подготовки производства, T₂ – трудоемкость изготовления изделия, T_{1.1} – трудоемкость разработки изготовления деталей, T_{1.2} – трудоемкость разработки технологических процессов соединения деталей, T_{1.3} – трудоемкость разработки и изготовления технологической оснастки, T_{2.1} – трудоемкость подготовительно-заключительных работ при обработке заготовок, T_{2.2} – трудоемкость технологических переходов обработки заготовок, T_{2.3} – трудоемкость вспомогательных переходов обработки заготовок, T_{2.4} – трудоемкость подготовительно-заключительных работ при соединении деталей, T_{2.5} – трудоемкость технологических переходов соединения деталей, T_{2.6} – трудоемкость вспомогательных переходов соединения деталей.

Note: T₁ – the complexity of technological preparation of production, T₂ – the complexity of manufacturing products, T_{1.1} – the complexity of the development of manufacturing parts, T_{1.2} – the complexity of the development of technological processes of connecting parts, T_{1.3} – the complexity of the development and manufacture of technological equipment, T_{2.1} – the complexity of preparatory and final work in the processing of workpieces, T_{2.2} – the complexity of technological transitions of workpiece processing, T_{2.3} – the complexity of auxiliary transitions of workpiece processing, T_{2.4} – the complexity of preparatory and final work when connecting parts, T_{2.5} – the complexity of technological transitions connecting parts, T_{2.6} – the complexity of auxiliary transitions of connecting parts.

Коэффициент заимствования (K_з):

$$K_z = a_{1.1} a'_{1.1} \frac{\sum D_{zi} b_{СЛi}}{D - D_{ПОК}} + a_{1.3} a'_{1.3} \frac{\sum D_{zi} b_{СЛi}}{D - D_{ПОК}},$$

где $a'_{1.1} = a_{1.1} - a_{1.1} \frac{\sum D_{ПОКi} b_{СЛi}}{D}$; $a'_{1.3} = a_{1.3} - a_{1.3} \frac{\sum D_{ПОКi} b_{СЛi}}{D}$; D_{зи} – i-я заимствованная деталь; b_{СЛi} – коэффициент сложности конструкции D_{зи}; D_{ПОК} – количество покупных деталей в изделии, шт.;

Коэффициент повторяемости деталей (K_{ПВД}):

$$K_{ПВД} = a_{1.1} a''_{1.1} \frac{\sum (D_{ПВДj} - 1) b_{СЛi} - \sum (D_{ПВД.3j} - 1) b_{СЛi}}{D - D_{ПОК} - D_3} +$$

$$+ a_1 a_{1.3}'' \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i} - \sum (D_{\text{ПВД}3j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}} - D_3} + a_2 a_{2.1}' \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}},$$

где $a_{1.1}'' = a_{1.1}' - a_{1.1}' \frac{\sum D_{3i} b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}}$; $a_{1.3}'' = a_{1.3}' - a_{1.3}' \frac{\sum D_{3i} b_{3i}}{D - D_{\text{ПОК}}}$; $a_{2.1}' = a_{2.1} - a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; $D_{\text{ПВД}j} - j$ -е число повторяемых деталей i -й группы наименования; $D_{\text{ПВД}3j} - j$ -е число повторяемых заимствованных деталей i -й группы наименования.

Коэффициент повторяемости соединений ($K_{\text{ПВС}}$):

$$K_{\text{ПВС}} = a_1 a_{1.2} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C} + a_1 a_{1.3}'' \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C} + a_2 a_{2.4} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C},$$

где $a_{1.2} = T_{1.2}/T_1$; $a_{2.4} = T_{2.4}/T_2$; $a_{1.3}''' = a_{1.3}'' - a_{1.3}'' \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; C – общее количество соединений в изделии; $C_{\text{ПВС}j} - j$ -е количество повторяемых соединений i -й группы одного наименования; $b_{\text{С}i}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида соединения на трудоемкость его изготовления.

Коэффициент типизации ($K_{\text{ТИП}}$):

$$K_{\text{ТИП}} = a_1 a_{1.1}''' \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}},$$

где $a_{1.1}''' = a_{1.1}'' - a_{1.1}'' \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}}$; $D_{\text{ТИП}}$ – количество типовых унифицированных деталей в КИ; $D_{\text{СОБ}}$ – количество собственных деталей КИ за исключением покупных, заимствованных и повторяемых; $b_{\text{СЛ.СР}}$ – коэффициент, показывающий средний уровень сложности типовых деталей.

Коэффициент точности ($K_{\text{ТЧ}}$):

$$K_{\text{ТЧ}} = a_2 a_{2.2}' \left(1 - \frac{S}{\sum A_i b_{\text{ТЧ}i} S_i} \right),$$

где $a_{2.2}' = a_{2.2} - a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; A_i – i -й квалитет точности размера поверхности, к которому предъявляются наиболее высокие требования точности; S – общая площадь всех поверхностей изготавливаемых деталей; S_i – i -я площадь поверхностей A_i .

Коэффициент шероховатости ($K_{\text{Ш}}$):

$$K_{\text{Ш}} = a_2 a_{2.2}' \left(1 - \frac{S}{\sum B_i b_{\text{Ш}i} S_i} \right),$$

где B_i – параметр шероховатости i -й поверхности деталей в изделии; $b_{\text{Ш}i}$ – коэффициент, учитывающий трудоемкость достижения параметра B_i при обработке детали, изменяется от нуля до единицы.

Коэффициент твердости ($K_{\text{ТВ}}$):

$$K_{\text{ТВ}} = a_2 a_{2.2}' \left(\frac{\sum S_{\text{ТВ}i} b_{\text{ТВ}i}}{S} \right),$$

где $S_{\text{ТВ}i}$ – площадь поверхности непокупных деталей с i -й твердостью материала изделия; $b_{\text{ТВ}i}$ – коэффициент, учитывающий влияние твердости i -го материала КИ.

Коэффициент массы (K_M):

$$K_M = a_2 a'_{2.3} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right) + a_2 a_{2.6} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right),$$

где $a'_{2.3} = a_{2.3} - a_{2.3} \frac{\sum D_{ПОК} b_{СЛ} i}{D}$; $a_{2.6} = T_{2.1}/T_2$; D_{Mi} – количество деталей и сборочных единиц в КИ i -й массы; b_{Mi} – коэффициент влияния i -й массы деталей и сборочной единицы в КИ на соответствующий подвид трудоемкости ее изготовления; D_M – количество деталей и сборочных единиц в КИ.

Коэффициент соединения (K_C):

$$K_C = a_2 a_{2.5} \left(\frac{\sum l_{3i} b_{3i} + \sum l_{Hi} b_{Hi} + \sum l_{Pi} b_{Pi} + \sum l_{СВi} b_{СВi} + \sum l_{Ki} b_{Ki} + \sum l_{КЛi} b_{КЛi}}{L} \right),$$

где $a_{2.5} = T_{2.5}/T_2$; l_{3i} , l_{Pi} , l_{Hi} , $l_{СВi}$, l_{Ki} , $l_{КЛi}$ – длины i -х соединений соответственно с зазором, резьбового, с натягом, сварного, клеевого и клепаного; L – общая длина всех соединений деталей в изделии; b_{3i} , b_{Pi} , b_{Hi} , $b_{СВi}$, b_{Ki} , $b_{КЛi}$ – степени влияния на трудоемкость i -го соединения соответственно с зазором, резьбового, с натягом, сварного, клеевого и клепаного.

Коэффициент методов точности размерной цепи ($K_{М.Р.Ц}$):

$$K_{М.Р.Ц} = a_1 a'_{1.2} \frac{ПВb_{Р.ПВ} + НПb_{Р.НП} + ГВb_{Р.ГВ} + РЕb_{Р.РЕ} + ПРb_{Р.ПР}}{n_{М.Р.Ц}} +$$

$$+ a_2 a'_{2.5} \frac{ПВb_{ИЗ.ПВ} + НПb_{ИЗ.НП} + ГВb_{ИЗ.ГВ} + РЕb_{ИЗ.РЕ} + ПРb_{ИЗ.ПР}}{n_{М.Р.Ц}},$$

где $a'_{1.2} = a_{1.2} - a_{1.2} \frac{\sum (C_{ПВСj} - 1) b_{Сi}}{C}$; $a'_{2.5} = a_{2.5} - a_{2.5} \left(\frac{\sum (C_{ПВСj} - 1) b_{Сi}}{C} \right)$; ПВ, НП, ГВ, РЕ, ПР – количество размерных цепей, собирающихся соответственно методом полной, неполной и групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки; $n_{М.Р.Ц}$ – общее число размерных цепей в КИ; $b_{Р.ПВ}$, $b_{Р.НП}$, $b_{Р.ГВ}$, $b_{Р.РЕ}$, $b_{Р.ПР}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на снижение трудоемкости $T_{1.2}$ метода соответственно неполной и групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки; $b_{ИЗ.ПВ}$, $b_{ИЗ.НП}$, $b_{ИЗ.ГВ}$, $b_{ИЗ.РЕ}$, $b_{ИЗ.ПР}$ – коэффициенты влияния на трудоемкость изготовления КИ соответственно метода полной, неполной и групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки.

Методика определения уровня технологичности конструкции изделия. Методика определяет уровень ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности:

$$ТКИ = K_{ПОК} + K_3 + K_{ПВД} + K_{ПВС} + K_{ТИП} + K_M + K_C + K_{МРЦ} + K_{\min},$$

где K_{\min} – наименьшее значение одного из коэффициентов $K_{Тч}$, $K_{Ш}$, $K_{ГВ}$, так как их влияние на трудоемкость проявляется через один и тот же фактор – режим обработки.

Зная значения всех перечисленных коэффициентов технологичности, их выстраивают в регрессионный ряд по степени снижения их влияния на полную трудоемкость изготовления КИ, а следовательно, и регрессионный ряд характеристик конструкции. Наличие последнего ряда показывает, с каких характеристик и в какой последовательности надо улучшать их значения, чтобы достигать заданный уровень ТКИ.

Исходными данными для построения указанного ряда коэффициентов технологичности являются их значения. Методика построения регрессионного ряда характеристик КИ включает следующие этапы:

- 1) построение ряда по степени влияния коэффициентов на снижение трудоемкости изготовления КИ;
- 2) определение резерва возможного увеличения влияния каждого коэффициента на снижение трудоемкости изготовления КИ;
- 3) построение регрессионного ряда коэффициентов по совместному влиянию их резервов и степени влияния на снижение трудоемкости изготовления КИ;
- 4) определение регрессионного ряда характеристик КИ по коэффициентам совместного влияния.

Таким образом, обработку КИ на технологичность следует начинать с улучшения характеристик конструкции согласно их регрессионному ряду, в котором резерв каждой из характеристик определяется как разность максимального и расчетного значений соответствующих им коэффициентов технологичности.

Максимальное значение коэффициента технологичности определяется следующим образом. Расчетная формула любого коэффициента технологичности представляет произведение $a_i a_{ij}$ (a_i – степень влияния вида трудоемкости на полную трудоемкость изготовления изделия; a_{ij} – степень влияния подвида трудоемкости на вид трудоемкости изготовления изделия) и множителя, отражающего соответствующую характеристику КИ.

Например, для точности максимальное значение $K_{Тч\max}$ будет при наибольшем значении дроби, когда квалитет равен 18 (ГОСТ 25346–89 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений»), тогда резерв изменения характеристики (точность деталей КИ) можно определить по формуле

$$\Delta K_{Тч} = K_{Тч\max} - K_{Тчр},$$

где $K_{Тч\max}$ – максимальное значение $K_{Тч}$; $K_{Тчр}$ – расчетное значение точности КИ.

Аналогично определяются резервы улучшения остальных характеристик конструкции изделия. Далее определяется коэффициент технологичности с учетом его влияния и резерва возможного изменения на снижения трудоемкости КИ по формуле

$$B_i = a_i a_{ij} \Delta K_i,$$

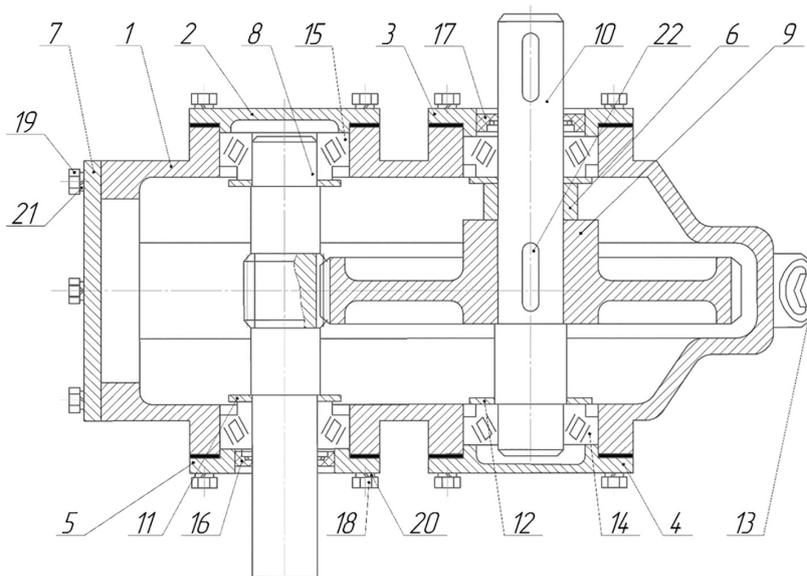
где ΔK_i – резерв изменения i -го коэффициента технологичности.

После определения значения каждого коэффициента технологичности строится регрессионный ряд коэффициентов технологичности и, следовательно, характеристик КИ.

Пример повышения технологичности изделия общетехнического назначения и обобщенные рекомендации по повышению технологичности конструкций. Рассмотрим построение регрессионного ряда характеристик КИ по изложенной методике на примере цилиндрического редуктора (см. рисунок), для которого исходными данными являются характеристики конструкции (табл. 2) и значения входящих в расчетные формулы аргументов: $a_i, a_{ij}, b_i, D, D_{Покi}, D_{3i}, D_{ПВДi}, D_{ПВД3i}, D_{ТИП}, D_{СОБ}, b_{СЛi}, S, S_i, ПВ, НП, РЕ, ПР, ГВ, l_{3i}, l_{Нi}, l_{Рi}, l_{СВi}, l_{Кi}, l_{КЛi}, C_{ПВСi}, b_{Сi}, C, D_{Mi}, D_M, b_{Mi}, S_{ТВи}$.

Получены расчетные значения коэффициентов технологичности и ТКИ цилиндрического редуктора: $K_{Пок} = 0,033; K_3 = 0,031; K_{ПВД} = 0,100; K_{ПВС} = 0,082; K_{ТИП} = 0,005; K_{Тч} = 0,089; K_{Ш} = 0,095; K_{ТВ} = 0,103; K_M = 0,063; K_C = 0,111; K_{МРЦ} = 0,096; ТКИ = 0,8$.

Далее построен регрессионный ряд коэффициентов технологичности по степени их влияния на снижение трудоемкости изготовления КИ. Для каждого коэффициента технологичности определен резерв и построен регрессионный ряд по степени снижения их влияния на трудоемкость КИ. Затем определены значения B_i , согласно которым построен регрессионный ряд коэффициентов технологичности (табл. 3).



Цилиндрический редуктор
 Cylindrical gearbox

Таблица 2. Характеристики деталей цилиндрического редуктора
 Table 2. Characteristics of cylindrical gearbox parts

№ детали на рисунке	Наименование детали	Количество деталей	Вид детали*	Количество размеров, шт.	Масса, кг	Твердость материала, НВ
1	Корпус	1	С	84	14,83	180
2	Крышка	1	С	9	0,36	160
3	Крышка	1	С	9	0,34	160
4	Крышка	1	С	13	0,45	160
5	Крышка	1	С	13	0,49	160
6	Втулка	1	С	3	0,35	160
7	Крышка	1	С	13	0,45	160
8	Вал-шестерня	1	С	30	2,34	210
9	Колесо	1	С	12	1,46	200
10	Вал	1	С	26	2,24	200
11	Маслоотражатель	2	З	5	0,15	120
12	Маслоотражатель	2	З	5	0,15	120
13	Пробка прокладка	2	З	8	0,3	120
13	Подшипник 7508	2	П	20	0,45	–
15	Подшипник 7808У	2	П	20	0,57	–
16	Манжета 1.1-35×58-1	1	П	3	0,01	–
17	Манжета 1.1-40×60-1	1	П	3	0,01	–
18	Болт М6×16.66.01.9	8	П	7	0,015	–
19	Болт М8×25.66.01.9	16	П	7	0,018	–
20	Шайба 6.65.Г.06.9	8	П	3	0,007	–
21	Шайба 8.65.Г.06.9	16	П	3	0,008	–
22	Шпонка 12×8×56	1	П	5	0,340	–

*С – собственная деталь; З – заимствованная деталь; П – покупная деталь.

*С – own part; З – borrowed part; П – purchased part.

Т а б л и ц а 3. Регрессионные ряды коэффициентов технологичности

T a b l e 3. Regression series of processability coefficients

<i>Регрессионный ряд коэффициентов технологичности по степени влияния на снижение трудоемкости изготовления КИ</i>											
K_i	K_C	$K_{ТВ}$	$K_{ПВД}$	$K_{МРЦ}$	$K_{Ш}$	$K_{Тч}$	$K_{ПВС}$	K_M	$K_{ПОК}$	K_3	$K_{ТИП}$
Значение K_i	0,111	0,103	0,100	0,096	0,095	0,089	0,082	0,063	0,033	0,031	0,005
<i>Регрессионный ряд коэффициентов технологичности по уменьшению величины резерва</i>											
K_i	$K_{ПОК}$	$K_{МРЦ}$	K_3	$K_{ПВС}$	K_C	$K_{ПВД}$	$K_{Тч}$	K_M	$K_{Ш}$	$K_{ТВ}$	$K_{ТИП}$
Значение ΔK_i	0,042	0,038	0,026	0,023	0,018	0,017	0,010	0,009	0,008	0,007	0,005
<i>Регрессионный ряд коэффициентов технологичности по уменьшению совместного влияния резерва и степени влияния на снижение трудоемкости его изготовления</i>											
K_i	$K_{МРЦ}$	$K_{ПОК}$	$K_{ПВС}$	K_C	$K_{ПВД}$	K_3	$K_{Тч}$	$K_{Ш}$	$K_{ТВ}$	K_M	$K_{ТИП}$
Значение B_i	0,004712	0,003150	0,002415	0,002322	0,001666	0,001482	0,000999	0,000824	0,000777	0,000666	0,000025

В соответствии с регрессионным рядом по уменьшению совместного влияния резерва и степени влияния на снижение трудоемкости его изготовления построен регрессионный ряд конструктивных характеристик (X) изделия:

$$X_{МРЦ} \rightarrow X_{ПОК} \rightarrow X_{ПВС} \rightarrow X_C \rightarrow X_{ПВД} \rightarrow X_3 \rightarrow X_{Тч} \rightarrow X_{Ш} \rightarrow X_{ТВ} \rightarrow X_M \rightarrow X_{ТИП}$$

Полученный ряд показывает, с какой характеристики, в какой последовательности и до какой характеристики КИ следует улучшать их значения для достижения заданного уровня технологичности конструкции цилиндрического редуктора, что позволяет повысить эффективность отработки КИ на технологичность.

По рассмотренному примеру для изделия общетехнического назначения видно, что для повышения ТКИ в подавляющем большинстве случаев и для снижения трудоемкости изготовления изделия наиболее целесообразно обращать внимание: во-первых, на методы достижения точности при сборке, а также использование в сборках максимального количества покупных деталей; во-вторых, на повторяемость видов соединений деталей в конструкции, снижение количества видов и трудоемкости выполнения соединений; в-третьих, на повторяемость деталей в общей конструкции, максимальное использование заимствованных деталей.

Вместе с тем вследствие уменьшения величины резерва минимальное влияние (в порядке убывания) на снижение трудоемкости изготовления изделия оказывают: геометрические характеристики поверхностей (точность и шероховатость); физико-механические свойства материала и изделия (твердость и масса); типизация и унификация деталей.

Последнее показывает, что типизацией процессов и унификацией конструкций не эффективно заниматься в рамках отдельного предприятия (особенно малого и среднего). При этом на уровне крупных объединений (холдингов, концернов), и особенно отраслей промышленности, это наиболее эффективный путь, о чем свидетельствуют первоочередные позиции по покупным и заимствованным конструкциям в соединениях деталей.

Заключение. Отработка конструкции изделия на технологичность на этапе разработки рабочей конструкторской документации в настоящее время осуществляется технологом совместно с конструктором, а ее результат зависит от их опыта и квалификации, что приводит к существенному росту трудоемкости данного процесса.

Предложен метод повышения эффективности процесса отработки КИ на технологичность, который базируется на оценке уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности, учитывающих степень их влияния на трудоемкость изготовления изделия, и позволяет построить регрессионный ряд характеристик конструкции изделия по степени их влияния на снижение трудоемкости его изготовления.

Регрессионный ряд характеристик конструкции дает возможность определить без участия специалистов, с какой характеристики, в какой последовательности и до какой характеристики КИ следует улучшать значения технологичности с целью достижения заданного уровня, что позволяет существенно повысить эффективность процесса отработки КИ на технологичность.

Список использованных источников

1. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.
2. Базров, Б. М. Анализ метода оценки технологичности конструкции изделия как предмета производства / Б. М. Базров, А. А. Троицкий // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – № 4 (241). – С. 39–43. <https://doi.org/10.14489/hb.2017.04.pp.039-043>
3. Ross, D. T. Structured analysis for requirements definition / D. T. Ross, R. E. Schoman // IEEE Trans. Softw. Eng. – 1977. – Vol. SE-3, Iss. 1. – P. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
4. Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle / В. М. Bazrov [et al.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 422–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>
5. Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
6. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry / eds.: F. Fores, R. Boyer. – Cambridge: Elsevier, 2019. – 465 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00712-7>
7. Системология объектов и процессов при цифровизации жизненного цикла изделий машиностроения / Б. М. Базров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 516–525. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-503-512>
8. Delchambke, A. Computer-aided Assembly Planning / A. Delchambke. – London: Chapman & Hall, 1992. – 276 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2322-8>
9. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
10. Базров, Б. М. Метод суммирования коэффициентов производственной технологичности конструкции изделия / Б. М. Базров, А. А. Троицкий // Технология машиностроения. – 2020. – № 8. – С. 70–75.
11. Базров, Б. М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства / Б. М. Базров. – М.: КУРС, 2023. – 324 с.

References

1. Korsakov V. S. *Fundamentals of Mechanical Engineering Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 416 p. (in Russian).
2. Bazrov B. M., Troitsky A. A. Analysis of a method of assessment of technological effectiveness of a desing of a product, as production subject. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal = HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2017, no. 4 (241), pp. 39–43 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/hb.2017.04.pp.039-043>
3. Ross D. T., Schoman R. E. Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1977, vol. SE-3, iss. 1, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
4. Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Hurevich V. L., Popok N. N. Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 422–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>
5. Bazrov B. M., Kheifetz M. I. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
6. Fores F., Boyer R., eds. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Cambridge, Elsevier, 2019. 465 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00712-7>
7. Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Hurevich V. L., Popok N. N. Systemology of objects and processes in digitalization of the life cycle of engineering products. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 503–512 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-503-512>

8. Delchambke A. *Computer-aided Assembly Planning*. London, Chapman & Hall, 1992. 276 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2322-8>
9. Vitiaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. “Industry 4.0”: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).
10. Bazrov B. M., Troitskii A. A. The method of summing the coefficients of production manufacturability of the product design. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2020, no. 8, pp. 70–75 (in Russian).
11. Bazrov B. M. *The Basis of Technological Preparation of Machine-Building Production*. Moscow, KURS Publ., 2023. 324 p. (in Russian).